

Incorporación del Académico Correspondiente Dr. Fernando Andrade

Conferencia

Contribuciones de la Ecofisiología de Cultivos a la producción agrícola

Fernando H. Andrade*

Balcarce, 30 de noviembre, 2012

* Unidad Integrada INTA Balcarce-Facultad de Ciencias Agrarias UNMP.
Conferencia dictada en ocasión del ingreso del autor a la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria

Temario

1. INTRODUCCIÓN
2. LOS DESAFÍOS DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
3. CONTRIBUCIONES DE LA ECOFISIOLOGÍA DE CULTIVOS
 - 3.1. Manejo de los cultivos para rendimiento y calidad
 - 3.2. Mejoramiento genético de los cultivos
 - 3.3. Eficiencia de uso de recursos e insumos y reducción de la contaminación
4. CONCLUSIONES
5. REFERENCIAS

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta un gran desafío ya que debe satisfacer la demanda creciente de alimentos y otros productos y reducir su impacto ambiental para no sobrepasar los límites del planeta (Nature, 2010; Godfray et al., 2010).

Los efectos negativos de la actividad agrícola sobre el ambiente resultan del producto de la población por el nivel de consumo por

habitante y por las tecnologías utilizadas para sostener los consumos globales (Meadows et al., 2012). Por lo tanto, satisfacer las futuras demandas reduciendo a la vez el impacto ambiental de la agricultura requerirá esfuerzos de toda la sociedad en su conjunto en cuanto a investigación y transferencia, cambios en los hábitos de uso y consumo, políticas, regulaciones e incentivos, control y monitoreo ambiental, inversiones en infraestructura, educación de la población, compromiso social y ambiental de las personas, etc. (Raskin et al., 2002; Meadows et al., 2012; Andrade 2011).

En lo referente a la investigación agronómica, se necesitan tecnologías que incrementen los rendimientos por unidad de superficie y la eficiencia de uso de los recursos en general y que reduzcan la degradación y contaminación del ambiente. Esto requiere, como factor preponderante, las tecnologías de procesos y de conocimientos (Satorre, 2004).

En este sentido, la Ecofisiología de Cultivos, o sea, el conocimiento de los procesos y mecanismos determinantes del crecimiento y del rendimiento de los cultivos en interacción con el ambiente, puede contribuir al aumento sustentable de la producción (Andrade et al., 2005; Hall y Sadras, 2009).

En este escrito se presenta, en primer lugar, una breve reseña sobre la evolución de la demanda y la oferta de productos agrícolas y los desafíos que hoy enfrentamos en cuanto a satisfacer futuras demandas reduciendo a la vez el impacto ambiental. Luego se explicita el rol que la Ecofisiología de Cultivos puede tener como tecnología de conocimientos para alcanzar el objetivo de una producción alta, eficiente y sustentable. Se enfatiza su utilidad para diseñar estrategias de manejo intensivas en conocimiento con el fin de i) aumentar la producción por unidad de su-

perficie y por unidad de tiempo, en cantidad y calidad; ii) alcanzar una mayor eficiencia de uso de recursos e insumos y iii) disminuir el uso de agroquímicos contaminantes. Además, se discuten los posibles aportes de la disciplina al mejoramiento genético de los cultivos para obtener genotipos con alto rendimiento potencial y mejor adaptación al ambiente de producción.

No es intención del autor presentar una revisión bibliográfica de los temas indicados, sino transmitir experiencias basadas en investigaciones sobre los principales cultivos extensivos de la llanura pampeana conducidas en la Unidad Integrada Balcarce.

2. LOS DESAFÍOS DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

La producción agrícola ha ido aumentando a lo largo del tiempo para cubrir las necesidades de alimentos de la población. El comienzo de la agricultura, hace más de 10.000 años, fue un paso gigante de la humanidad ya que posibilitó hábitos más sedentarios y, por lo tanto, la aparición de las primeras civilizaciones.

A fines del siglo XVIII, cuando la población del mundo era inferior a los mil millones, Malthus (1798) predijo hambrunas generalizadas al observar que el crecimiento poblacional superaba al incremento en producción de alimentos. Sin embargo, la Revolución Agrícola que se estaba produciendo en Europa en los siglos XVIII y XIX, caracterizada por un rápido y masivo incremento en la producción y por un amplio mejoramiento de la tecnología utilizada para cultivar la tierra (Bellis, 2010) aumentó considerablemente la oferta de alimentos postergando las predicciones negativas. Este proceso se basó, fundamentalmente, en la implementación de rotaciones, mejores herramientas, nuevos cultivos,

abonos y en el incremento de la superficie arable.

En la segunda mitad del siglo XIX, Pasteur concluyó que las enfermedades infecciosas tienen su origen en gérmenes que pueden propagarse entre personas (Dubos, 1985). Gracias a este descubrimiento se produjo una notable reducción de la mortalidad, especialmente de la infantil que, junto con el mantenimiento de altas tasas de natalidad, resultaron en un marcado incremento en la tasa de crecimiento poblacional que llegó al 2,1% anual a mediados del siglo XX (UN, 2008). Nuevamente, se pronosticó un futuro de hambrunas generalizadas. Sin embargo, la producción de los cultivos se incrementó marcadamente durante las últimas 4 décadas debido, principalmente, a un aumento en los rendimientos por unidad de superficie como consecuencia del proceso denominado “Revolución Verde”. Este proceso consistió, principalmente, en el incremento del uso de fertilizantes y herbicidas, y en la utilización de cultivares de trigo y arroz que presentaban alto potencial de rendimiento y adaptación a distintas latitudes, tolerancia a enfermedades, y estatura reducida que permitió disminuir el vuelco asociado con altas dosis de fertilizantes (Evans, 1997; Borlaug, 2007).

La producción mundial de los principales cereales (maíz, trigo y arroz) ronda actualmente 2.500 millones de toneladas (FAO, 2011) y algunas predicciones indican que crecerá a valores cercanos a las 4.000 millones de toneladas en respuesta, principalmente, a demandas crecientes originadas en el incremento de la población, de la calidad de la dieta y de otros usos no relacionados con la alimentación (Andrade, 2011).

Satisfacer estas demandas requerirá mantener o incluso aumentar la actual tasa de incremento en la producción global de

cereales de 31 millones de toneladas por año, aunque la mayor parte de estos incrementos se deberán producir en los países en vías de desarrollo (Fischer et al., 2009; Tester y Langridge, 2010). Estos aumentos se pueden dar por adiciones en la superficie cultivada, por una mayor cantidad de cultivos por año o por mayores rendimientos por unidad de superficie.

Las actuales preocupaciones y legislaciones sobre la expansión de la superficie cultivada hacia regiones más susceptibles (Bringezu et al., 2010) hacen que los principales esfuerzos para incrementar la producción deban enfocarse principalmente en los rendimientos por unidad de área (Bruinsma, 2009).

Los rendimientos de los cultivos por unidad de área pueden aumentar por incrementos en los rendimientos potenciales o por el cierre de la brecha entre los rendimientos reales y los potenciales (Fischer y Edmeades, 2010). Esta brecha puede reducirse por el uso de fertilizantes, el control de adversidades bióticas, el riego, la mecanización, la adaptación de los cultivares a los ambientes de producción, etc. Expresada como porcentaje de los rendimientos reales, la brecha ronda el 50% en áreas más tecnificadas y puede alcanzar valores superiores al 200% en regiones menos desarrolladas como Africa subsahara (Fischer y Edmeades, 2010; Edgerton, 2009) región en la cual no se produjo el proceso de la revolución verde.

No obstante, nuevas voces de alarma surgen (Bourne, 2009) al estabilizarse los rendimientos en varias regiones del mundo (Cassman et al., 2010) y por estar la producción agrícola futura comprometida por la degradación de tierras, la contaminación (JICA-INTA, 2004) y el cambio climático (IPCC, 2007).

Enfrentamos un enorme desafío a nuestra capacidad creativa e innovadora en cuanto a satisfacer la futura demanda de pro-

ductos agrícolas y reducir el impacto ambiental no sobrepasando los límites del planeta (Nature, 2010; Godfray et al., 2010).

La agricultura ejerce una gran presión sobre el medio ambiente comprometiendo los recursos y la producción de alimentos en cantidad y calidad. Los principales efectos negativos de la actividad agrícola sobre el ambiente son: la erosión y degradación del suelo por deforestación y laboreo excesivo, la pérdida de nutrientes del suelo, la contaminación con biocidas del agua, la tierra y los alimentos, la pérdida de biodiversidad, la acumulación de nitratos y otros productos químicos en las napas, las pérdidas de tierra agrícola por salinización, el agotamiento de las fuentes de agua, la emisión de gases de efecto invernadero, y, en suma, la pérdida de servicios ecosistémicos. (JICA-INTA, 2004; Viglizzo et al., 2011). En las regiones más pobres, la mala distribución de los recursos, la marginalidad y la necesidad de alimentos fuerzan a los agricultores a cultivar tierras de alta pendiente, poco profundas y semiáridas sin los recursos adecuados, por lo que los suelos son degradados y erosionados. Por el contrario, en áreas donde el nivel tecnológico de la producción es alto, los principales problemas surgen del mal uso del riego que produce degradación de tierras por salinización y del uso indiscriminado de biocidas y fertilizantes que produce una seria contaminación ambiental y atenta contra la inocuidad de los alimentos.

La huella ecológica (Wackernagel y Rees, 1996) de la agricultura se puede disminuir i) reduciendo el incremento de la demanda de alimentos a través de una menor tasa de crecimiento poblacional (especialmente a países en vías de desarrollo), de una dieta equilibrada que evite consumos excesivos y cuantiosos desperdicios de alimentos (especialmente en países desarrollados) y ii) utilizando

tecnologías no contaminantes que no degraden el ambiente y que incrementen la eficiencia de uso de recursos e insumos.

Considerando estrictamente lo referido a la producción agrícola, el manejo racional y adecuado de los recursos implica disponer de técnicas para i) reducir la erosión y degradación de los suelos (labranza reducida, siembra directa, cultivos en franja, cultivos de cobertura, rotaciones, fijación biológica de N, abonos orgánicos, fertilización eficiente, etc.), ii) evitar la contaminación química (manejo integrado de plagas, control biológico, buenas prácticas de aplicación de agroquímicos, productos menos nocivos, transgénicos, etc.), iii) reducir la salinización (riego racional, cultivares tolerantes a sales, etc.), iv) hacer un uso más eficiente de recursos e insumos (cultivares de mayor estabilidad y potencial de rendimiento, manejo adecuado de cultivos y del riego, agricultura de precisión, etc.), y v) mantener la biodiversidad (refugios, limitaciones a la deforestación, etc.) (JICA-INTA, 2004). Algunas de estas técnicas ya han sido desarrolladas y aplicadas con éxito; otras necesitan de un mayor esfuerzo en investigación y/o adaptación.

El conjunto de técnicas indicadas, bien implementadas, puede contribuir a producir los alimentos requeridos y a la reducción del impacto ambiental (Viglizzo et al., 2011; Huang et al., 2002; Satorre, 2005). La meta es alcanzar una producción agrícola sustentable que consiste en producir la cantidad de alimentos para satisfacer de manera continua y rentable las necesidades de la creciente población haciendo un uso eficiente y seguro de los recursos naturales y de los insumos externos y asegurando los servicios ecosistémicos para la sociedad (Ikerd, 1990; Tilman et al., 2002).

El incremento de la producción no sólo debe ser considerado como un aumento en el uso de insumos, sino que deberá incluir,

como factor preponderante, tecnologías de procesos y de conocimientos que resulten de esfuerzos integrados de especialistas de distintas disciplinas (Satorre, 2004). En este sentido, la Ecofisiología de Cultivos puede contribuir al aumento sustentable de la producción.

3. CONTRIBUCIONES DE LA ECOFISIOLOGÍA DE CULTIVOS

La Ecofisiología de Cultivos estudia la relación entre el funcionamiento de los cultivos y su producción, y como dicho funcionamiento es afectado por el ambiente. Integra conceptos de distintas disciplinas a mayor nivel de complejidad con la finalidad de generar pautas de manejo para los productores y de orientar al mejoramiento genético de las especies cultivadas.

Incluye el estudio de los factores que determinan el desarrollo y el crecimiento de los principales cultivos, el cociente fototermal, la plasticidad vegetativa y reproductiva de las plantas, la partición de los productos de la fotosíntesis entre los distintos destinos metabólicos, la identificación y caracterización de los momentos más críticos para la determinación del número de granos fijados y del rendimiento en cada cultivo, la relación entre la fuente de asimilados y la demanda de destinos reproductivos durante el periodo de llenado de granos, la estabilidad del índice de cosecha, la eficiencia de uso de recursos y insumos, entre muchos otros conceptos. También aborda el estudio de las relaciones hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera y de la dinámica de los nutrientes en las plantas, así como los efectos de las deficiencias nutricionales e hídricas en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Detalles sobre estos temas pueden encontrarse en Gardner

et al., 1985; Egli, 1998; Andrade y Sadras, 2002; Satorre et al., 2008; Sadras y Claderini, 2009.

El conocimiento de los procesos y mecanismos determinantes del crecimiento y rendimiento de los cultivos en los distintos ambientes es necesario para aumentar la producción de manera sustentable ya que nos orienta en la elección de prácticas de manejo más apropiadas (Andrade et al. 2005; Andrade et al., 2010), guía al mejorador en la obtención de genotipos de mayor potencial de rendimiento más eficientes y mejor adaptados a ambientes actuales y futuros (Edmeades et al., 2004; Andrade et al., 2009; Hall y Sadras, 2009) y brinda información para un manejo eficiente y adecuado de recursos e insumos, con una menor dependencia de insumos no renovables y/o contaminantes.

Provee además, los conceptos básicos necesarios para elaborar las funciones y algoritmos de los modelos de simulación del crecimiento y rendimiento de los cultivos (Boote *et al.*, 2013, Hanks y Ritchie, 1991). Estos modelos son herramientas útiles para explorar y predecir el impacto de variaciones climáticas y edáficas, del genotipo, de prácticas culturales, de paquetes tecnológicos y de adversidades bióticas sobre la productividad de los cultivos.

3.1. Manejo de los cultivos para rendimiento y calidad

Los temas enunciados constituyen las bases conceptuales para entender el efecto de las prácticas del manejo, del ambiente, del genotipo y de las interacciones entre estos factores sobre la producción. Por lo tanto, son útiles para diseñar estrategias de manejo intensivas en conocimiento que contribuyan al incremento del rendimiento en cantidad y calidad y a una mejor adaptación

de los cultivos a los ambientes de producción, en el marco de una agricultura sustentable.

Los principios ecofisiológicos permitieron analizar y evaluar los efectos de distintas prácticas de manejo como fecha de siembra, densidad de plantas, espaciamento entre hileras, uniformidad de plantas, la fertilización y el riego, grupo de madurez del cultivar, siembra directa, barbecho, rotaciones, etc. sobre el crecimiento y rendimiento de los principales cultivos extensivos (Cirilo et al., 1994; Uhart y Andrade 1995; Otegui et al., 1995a; Otegui, 1997; Andrade et al., 2002a; Andrade y Sadras, 2002; Capristo et al., 2007; Sarlangue et al., 2007; Monzón et al., 2012). A continuación se presentan algunos ejemplos de la aplicación de los conocimientos de la disciplina a la producción de granos en la región pampeana.

Los periodos críticos para la determinación del número de granos y del rendimiento son la floración en maíz y girasol, preanthesis en trigo, y la floración avanzada en soja (Fischer, 1985, Cantagallo et al., 1997; Uhart y Andrade, 1991; Andrade et al., 1999; Egli y Bruening, 2005). El objetivo del manejo de los cultivos es alcanzar un estado fisiológico óptimo en dichas etapas (Andrade et al., 2005) caracterizado por i) alta tasa de crecimiento de cultivo, que está directamente relacionada con la radiación interceptada (Shibles y Weber, 1966), ii) prolongada duración, que está inversamente relacionada con la temperatura (Summerfield et al., 1993), iii) alta partición de materia seca a estructuras reproductivas que es función de la fuerza relativa de los distintos destinos metabólicos (Slafer et al., 1990; Vega et al., 2001), y iv) elevada cantidad de granos fijados por unidad de biomasa asignada a estructuras reproductivas (Abbate et al, 1998). Luego, durante el periodo de llenado de granos, la fuente de asimilados no debe limitar el crecimiento de los granos (Borrás et al., 2004).

El cociente entre radiación incidente o interceptada y temperatura es, entonces, un integrador de la tasa y duración del crecimiento en las etapas críticas. Este cociente fototermal es un buen estimador del número de granos y del rendimiento en cereales invierno-primaverales (Fisher, 1985) y en girasol (Cantagallo et al., 1997), pero necesita ajustes adicionales en aquellas especies en las que el incremento de temperatura entre 15 y 30°C resulta en marcados aumentos de la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa (Maíz, Andrade et al, 1993) o en las que el fotoperíodo ejerce un importante control de la duración de las etapas reproductivas (Soja; Kantolic y Slafer, 2001).

Estos conocimientos fueron de utilidad para ajustar la fecha de siembra, el ciclo del cultivar, y el manejo del agua y los nutrientes en varios sistemas de producción con el fin de optimizar el estado del cultivo en sus momentos más críticos (Cirilo et al., 1994; Capristo et al., 2007; Andrade y Sadras 2002). Otro ejemplo de aplicación práctica de estos conocimientos fue la recomendación de reducción del espaciamiento entre hileras en aquellos casos en que esta práctica resultaba en incrementos en la radiación interceptada y en el crecimiento del cultivo durante los períodos críticos indicados (Andrade et al., 2002a).

Por otro lado, conocer la respuesta del desarrollo y el crecimiento de los diferentes cultivos a las variaciones en fecha de siembra y densidad de plantas fue también necesario para orientar el manejo agronómico. En aquellos casos en que el retraso de fecha de siembra redujo el área foliar de las plantas y la interceptación de radiación en los períodos críticos por afectar diferencialmente las velocidades de crecimiento y de desarrollo vegetativos, se recomendó incrementar la densidad de plantas y reducir el es-

paciamiento entre hileras con el objetivo de mejorar la captación de radiación por parte de las plantas (Calviño et al., 2002).

Para las recomendaciones de siembra se tuvo en cuenta, además, que las especies o cultivares con menor plasticidad vegetativa y reproductiva son menos tolerantes a reducciones en la densidad de plantas; mientras que las especies o cultivares con inestabilidad en el índice de cosecha ante la reducción en los recursos por planta son menos tolerantes a incrementos en la densidad de plantas (Vega y Andrade, 2002). La combinación de estas características confiere además menor tolerancia a incrementos en la desuniformidad del cultivo (Andrade y Abbate, 2005). Por otro lado, en casos de ambientes poco productivos por baja fertilidad o deficiencias hídricas en Diciembre-Enero, se propuso disminuir la densidad de plantas en maíz pero aumentarla en soja. En maíz, para evitar la drástica reducción en el índice de cosecha ante baja disponibilidad de recursos por planta, propia de esta especie (Vega et al., 2001; Vega y Andrade, 2002). En soja, para recuperar intercepción de radiación ya que el crecimiento foliar es un proceso fisiológico altamente sensible a deficiencias hídricas y nutricionales (Boyer 1970).

Adicionalmente, entender que el ambiente térmico y radiativo fija un techo de producción que no podemos superar con el agregado de insumos (fertilizantes y riego) (Andrade 1992) fue un concepto muy útil para la implementación de esquemas de alta producción y cuando se deseaba transferir un paquete tecnológico de una región a otra.

Los principios ecofisiológicos también fueron necesarios para adecuar el manejo del cultivo en función de la variabilidad espacial de un lote o sitio de producción en cuanto a periodo libre de heladas, disponibilidad de agua, etc. Establecimientos del SE de

la Provincia de Buenos Aires rediseñaron los límites de los potreros y las rotaciones de cultivos utilizando los conceptos mencionados (Calviño Pablo, com. personal), lo que resultó en amplios beneficios y en un uso más eficiente de los insumos y recursos.

En las lomas, caracterizadas por poseer suelos someros con poca disponibilidad de agua y un mayor periodo libre de heladas, se eliminó el cultivo de maíz por su alta susceptibilidad a sequía en floración, y se optó por utilizar variedades de soja de ciclo más largo aprovechando la elevada estabilidad de rendimiento propia de estos cultivares derivada de alta plasticidad reproductiva y prolongado periodo de floración. Además, se mantuvo el trigo en las rotaciones por crecer en momentos de bajos déficit de presión de vapor pero se anticipó la floración para aprovechar el menor riesgo de heladas. Esto resultó en un mayor cociente fototermal en el periodo crítico de preantesis (mayor potencial de rendimiento), menor probabilidad de déficit hídrico en llenado de granos y una anticipación de la siembra del cultivo de soja de segunda.

Por otro lado, en los bajos caracterizados por mayor riesgo de heladas y mayor disponibilidad de agua en el suelo (incluso presencia de napa) se decidió cultivar maíces y sojas de ciclo más corto adecuando densidad de plantas. Los maíces en dichos ambientes presentaron rendimientos altos y estables a pesar de su precocidad, por menor probabilidad de deficiencias hídricas en floración. Además, las sojas precoces sembradas con altas densidades de plantas y reducidos espaciamientos entre hileras para asegurar una alta interceptación de la radiación, expresaron un alto potencial de rendimiento por el adelantamiento de sus periodos reproductivos críticos hacia momentos con mayores temperaturas y radiaciones incidentes y por la adecuada disponibilidad hí-

drica. Los trigos se ajustaron para florecer en momentos con bajo riesgo de heladas y se eliminó la soja de segunda de la rotación por la imposibilidad de sembrarla temprano.

La agricultura de precisión (Stafford, 2005) también requiere de los conceptos de la disciplina, por ejemplo, para ajustar dosis variables de densidad de plantas y fertilización en el cultivo de maíz en función del microambiente en un potrero.

Los conocimientos sobre los factores determinantes del crecimiento y rendimiento de las especies cultivadas también aportaron ideas para incrementar la productividad del doble cultivo secuencial o intersechado. El ciclo y las características estructurales de los cultivares, el espaciamiento entre hileras, los momentos de siembra y de intersechadura, las densidades de plantas, etc. fueron seleccionados en función del estado fisiológico de los cultivos en los periodos críticos para la determinación del rendimiento (Andrade et al., 2012; Coll et al., 2012; Caviglia y Andrade 2010).

Finalmente, los conocimientos ecofisiológicos constituyeron las bases para el estudio de los factores que determinan la calidad del producto primario. Esta variable, definida en base a uno o varios atributos valorados objetiva o subjetivamente, es afectada por el genotipo, y está generalmente controlada por pocos genes; no obstante, también puede ser modificada por el ambiente y el manejo del cultivo (Aguirrezábal y Andrade, 1998, Aguirrezábal et al., 2009 como lo indican los siguientes ejemplos. El porcentaje de aceite en el grano de girasol y soja y la dureza del grano de maíz se incrementan al aumentar la disponibilidad de radiación por grano durante el periodo de llenado (Dosio et al., 2000; Andrade y Ferreiro, 1996; Cirilo et al., 2011). Por otro lado, el porcentaje de proteína y la calidad panadera en trigo se

diluyen ante condiciones de alta radiación y baja temperatura durante el llenado de los granos que favorecen más que proporcionalmente la acumulación de almidón (Martre et al., 2011). Por último, la proporción de ácido oleico en el aceite de girasol, maíz y soja aumentan con el incremento de la radiación interceptada por grano o de la temperatura durante el periodo de llenado (Izquierdo et al., 2002; Izquierdo et al., 2009). En base a estos conceptos, se pudieron explicar efectos de la fecha de siembra, el ciclo del cultivar, la densidad de plantas, la localidad, y el año sobre la composición y calidad de los granos.

3.2. Mejoramiento genético de los cultivos

La meta de los fitomejoradores es producir cultivares con rendimientos en grano altos y estables a través de los ambientes de producción (Hallauer, 2007). Esto constituye un gran desafío pues dichos rasgos complejos dependen fuertemente del ambiente, del genotipo y de sus interacciones.

La Ecofisiología de Cultivos guía al mejorador en la obtención de genotipos de mayor potencial de rendimiento, más eficientes en el uso de recursos e insumos y mejor adaptados a ambientes actuales y futuros a través del análisis de cultivares liberados en distintas épocas y de la identificación de rasgos apropiados para las especies cultivadas (Edmeades et al., 2004; Wollenweber et al., 2005; Andrade et al., 2009; Sala y Andrade, 2010).

El estudio con bases fisiológicas de cultivares liberados al mercado en diferentes décadas permitió cuantificar el aporte del mejoramiento genético al rendimiento de los cultivos e identificar los caracteres involucrados. Los híbridos modernos de maíz presenta-

ron mayores rendimientos y mayor producción por unidad de agua consumida o de N absorbido que los antiguos debido, en gran parte, al incremento en el índice de cosecha, asociado con el aumento de la capacidad de los destinos reproductivos (Robles et al., 2011; Nagore et al., 2010). Este incremento en la capacidad de los destinos reproductivos resultó, en ciertas condiciones, en limitaciones de fuente fotosintética durante el llenado de los granos (Cerrudo et al., 2013; Echarte et al., 2006). Además, los materiales modernos de maíz mostraron mayor tolerancia a altas densidades de plantas (Russell, 1984; Tollenaar y Lee, 2002; Echarte et al., 2013). La información obtenida en estos estudios indica posibles futuras vías para incrementar la eficiencia de la selección de nuevos cultivares.

Por otro lado, la Ecofisiología de Cultivos debe contribuir a i) caracterizar los ambientes de producción, ii) identificar los rasgos claves para rendimientos altos y estables y para una alta eficiencia de uso de recursos e insumos en dichos ambientes, iii) identificar caracteres secundarios fáciles de monitorear, de alta heredabilidad y asociados con el desempeño del cultivo y iv) entender y explicar las complejas interacciones de dichos rasgos con el ambiente y con el fondo genético (Hall y Sadras, 2009; Andrade et al., 2009).

Hall y Sadras (2009) presentan una lista de casos en los que los especialistas en la disciplina identificaron y evaluaron rasgos de interés para los fitomejoradores, relacionados con el rendimiento y la tolerancia a la sequía. Si bien algunos casos fueron exitosos (e.g., Bolaños y Edmeades, 1993; Rebetzke et al., 2002; Hall y Sadras, 2009), en general la fisiología de cultivos no ha contribuido significativamente al mejoramiento genético por rendimiento y estabilidad (Sinclair y Purcell, 2005). Algunas de las razones son i) los escasos vínculos entre disciplinas, ii) la limitada disponibilidad

de métodos rápidos precisos y baratos de fenotipado aplicables a grandes poblaciones de genotipos, y iii) la atenuación de los rasgos y las fuertes interacciones resultantes por subir en los niveles de organización (Wollenweber et al., 2005; Passioura, 2007; Andrade et al., 2009; Fiorani y Schurr, 2013).

Un rasgo particular generalmente se atenúa al subir en los niveles de organización debido a que los factores interactúan y la complejidad se incrementa. Además, los rasgos pueden estar controlados por redes de genes de manera que la acción de un único gen particular en una secuencia de reacciones bioquímicas puede ser poco relevante (Chapman et al., 2002; Sinclair y Purcell, 2005). Estos efectos reducen la importancia a nivel de cultivo a campo o sistemas de producción de muchos caracteres identificados en niveles inferiores de complejidad.

Las interacciones y atenuaciones se magnifican y son más difíciles de interpretar para caracteres asociados con el rendimiento potencial o el rendimiento bajo limitada disponibilidad de agua (Mackay 2001; Holland, 2007). Por ejemplo, QTLs o genes asociados con el rendimiento ante déficits hídricos son generalmente de poco efecto individual, específicos del cruzamiento y presentan fuertes interacciones con el ambiente (Campos et al., 2004; Ashraf, 2010; Maccaferri et al., 2011).

En este marco, el rol de la Ecofisiología de Cultivos en la identificación de rasgos que confieran rendimientos altos y estables, y en el entendimiento de los complejos mecanismos subyacentes, con fuerte interacción con el ambiente, es altamente relevante (Andrade et al., 2009). La disciplina puede entonces contribuir a dicha tarea en aproximaciones descendentes en la escala de complejidad (Chapman et al., 2002) pero también en aproximaciones

ascendentes, interpretando y explotando la abundante y creciente información disponible derivada de estudios moleculares (del gen al fenotipo; Ishitani et al., 2004; Ashraf, 2010). Debe aportar además, métodos rápidos, sencillos y baratos de fenotipado para monitorear grandes poblaciones (Pereyra Irujo et al., 2012).

En síntesis, para efectivizar la contribución de la especialidad a los programas de mejoramiento genético se deben identificar los caracteres relevantes para el desempeño de los cultivos en los ambientes de producción, encontrar variabilidad en sus expresiones, que dicha variabilidad sea heredable, y que se puedan monitorear fácilmente (Bruce et al., 2002; Andrade et al. 2009). Las actuales técnicas de biología molecular (i.e. transgénicos, mutaciones, uso de marcadores moleculares, genómica, etc.), pueden facilitar los tres últimos pasos de este proceso (Jones et al., 1997). Quedan como factores limitantes de la cooperación interdisciplinaria la identificación de los procesos y mecanismos determinantes del rendimiento y su estabilidad y el desarrollo de métodos simples de fenotipado, campos en los cuales la Ecofisiología de Cultivos puede hacer importantes aportes.

Paralelamente, el estudio de los mecanismos determinantes de la producción y adaptación de los cultivos al ambiente puede hoy ser facilitado por las técnicas disponibles en el campo de la biología molecular (líneas o cultivares casi isogénicos, transgénicos, sobreexpresión y silenciamiento de genes, poblaciones caracterizadas a través de marcadores moleculares, genes candidatos, genómica, etc.; Tuberosa y Salvi, 2009, Tuberosa et al., 2011). Estas técnicas deben proveer la principal fuente de materiales genéticos a evaluar para investigar caracteres potencialmente relevantes (León et al., 2001; Fonts et al., 2008; Creus et al., 2007).

Finalmente, algunos fitomejoradores han venido aplicando los conceptos ecofisiológicos en su trabajo cotidiano de selección. Es común encontrar materiales recientes de alto potencial de rendimiento y tolerantes a estrés (Santa Eduvigis, 2010; Tester y Landgridge, 2010, Castro 2013). En maíz, este resultado puede ser consecuencia de que los mejoradores hayan seleccionado los nuevos cultivares en altas densidades de siembra y de que se realicen las pruebas de nuevos materiales en un amplio rango de ambientes que incluyen situaciones de estrés hídrico y nutricional. La tolerancia a altas densidades es sucedánea de tolerancia a estrés ambiental (Andrade et al., 2002b). Este concepto, junto con otros principios ecofisiológicos tales como i) la removilización de reservas y debilitamiento del tallo de maíz mediante una baja relación fuente/destino reproductivo durante el llenado de los granos para seleccionar por tolerancia a vuelco y quebrado, ii) la identificación de periodos críticos durante los cuales se debe optimizar el estado fisiológico del cultivo, entre otros, conforman una base conceptual que asiste al fitomejorador en su tarea diaria.

3.3. Eficiencia de uso de recursos e insumos y reducción de la contaminación

Los principios de la Ecofisiología de Cultivos brindan información para un manejo eficiente y adecuado de recursos y con una menor dependencia de insumos no renovables y/o contaminantes.

El incremento del rendimiento y su estabilidad como resultado de la aplicación de prácticas de manejo de cultivos intensivas en conocimiento y del mejoramiento genético resultan en un uso más eficiente de los limitados recursos e insumos.

Los conocimientos sobre i) la dinámica de acumulación de nutrientes en las plantas, ii) los requerimientos de nutrientes minerales y de agua y iii) los efectos de deficiencias hídricas y nutricionales sobre el crecimiento vegetal, (Andriani et al., 1991; Uhart y Andrade, 1995; Otegui, et al., 1995b; Della Maggiora et al., 2002) constituyeron las bases para un manejo eficiente y sustentable de la fertilización y del agua disponible. Por otro lado, altas densidades de plantas, espaciamiento entre hileras reducidos junto con características adecuadas del genotipo resultaron en una alta eficiencia de captura o absorción de nutrientes por parte del cultivo (Barbieri, 2008; Pietrobón, 2012). Dichas prácticas culturales y los cultivos dobles incrementaron la captura de recursos hídricos reduciendo excesos por percolación y escurrimiento superficial (Caviglia et al., 2004; Andrade et al., 2012, Barbieri et al., 2012).

En un proyecto multidisciplinario (Caviglia et al., 2012) la elección de paquetes productivos para el maíz, basados en un manejo racional intensivo en conocimiento que incluyó cultivares de alto potencial y estabilidad del rendimiento, altas densidades de plantas, espaciamiento entre hileras reducidos, stand uniforme, fertilización en función de los requerimientos y del momento de demanda de nutrientes, etc. resultó en incrementos en la captura de nutrientes y en la eficiencia de uso de nitrógeno y agua disponibles y, por lo tanto, en una producción más homeostática proporcionalmente menos dependiente de insumos externos.

Los conceptos de la Ecofisiología de Cultivos también ayudaron a interpretar y analizar los daños que producen los organismos perjudiciales. En concordancia, Boote et al. (1983) y Johnson (1987) establecieron distintos tipos de daños considerando aspectos fisiológicos entre los que destacan reducción de área

foliar e intercepción de radiación, pérdida de eficiencia fotosintética, reducción de partición de biomasa a destinos de interés comercial, etc. A continuación se presentan algunos ejemplos de la utilización de conocimientos que pueden resultar en una reducción del uso de agroquímicos.

Los umbrales de daño por reducción de área foliar activa durante las etapas vegetativas y las necesidades de control dependen del momento y, principalmente, de la plasticidad de los individuos y de los factores ambientales, que en conjunto determinan la capacidad de recuperación de cobertura foliar previo a los momentos críticos de determinación del número de granos (Sadras 2002). Además, los umbrales de daño por pérdida de área foliar y de eficiencia fotosintética durante el llenado de granos son función, entre otras variables, de la relación entre la demanda de los destinos reproductivos y la capacidad fotosintética del cultivo, que a su vez son moduladas por el ambiente.

Por otro lado, la habilidad competitiva del cultivo con las malezas depende de las prácticas culturales y del genotipo. Así, el incremento de la densidad de plantas, la reducción del espaciamiento entre hileras, y la utilización de cultivares más foliosos y de hojas más planófilas incrementaron la intercepción de radiación por parte del cultivo en etapas tempranas y, por lo tanto, su habilidad competitiva contra las malezas (Bedmar et al., 2002 Mc Donald y Gill, 2009), posibilitando la reducción de las dosis de herbicidas.

Los conocimientos ecofisiológicos indicados, sumados al uso de i) cultivares tolerantes o resistentes por mejoramiento tradicional y por biotecnologías (transgénicos, mutaciones, marcadores moleculares; Creus et al., 2007), ii) agroquímicos menos tóxicos y persistentes derivados de sustancias naturales (Viglizzo et al.,

2010), iii) buenas prácticas de aplicación de fertilizantes y biocidas (Jayasundara et al., 2007; INTA 2013), y iv) todas aquellas otras actividades incluidas en un manejo integrado de organismos perjudiciales (Dent, 1995) contribuyen a reducir la utilización de agroquímicos contaminantes y constituyen uno de los pilares para alcanzar una agricultura eficiente y sustentable.

4. CONCLUSIONES

La proyección de la demanda de productos agrícolas para las próximas décadas implica un enorme desafío a nuestra capacidad creativa e innovadora. Los ingenieros agrónomos tienen una responsabilidad central en satisfacer dichas demandas reduciendo a la vez el impacto ambiental de las actividades agropecuarias.

Los conocimientos sobre los procesos y mecanismos determinantes del crecimiento, rendimiento y calidad del producto primario, en interacción con el ambiente, son críticos y estratégicos para diseñar estrategias de manejo intensivas en conocimiento con el fin de i) aumentar la producción por unidad de superficie y por unidad de tiempo, ii) mejorar la calidad de producto primario; iii) adecuar los cultivos a los ambientes de producción, iv) lograr una mayor eficiencia de uso de recursos e insumos y v) disminuir el uso de agroquímicos contaminantes. Por otro lado, dichos conocimientos pueden guiar a los mejoradores genéticos de cultivos en la obtención de genotipos con alta potencialidad y estabilidad de rendimiento.

Por lo tanto, la Ecofisiología de Cultivos tiene un rol fundamental en la generación de tecnologías de procesos y de conocimientos necesarias para una intensificación sustentable de la producción agrícola.

5. REFERENCIAS

Abbate P., F. Andrade, L. Lázaro, J. Bariffi, H. Berardocco, V. Inza and F. Marturano. 1998. Grain Yield Increase in Recent Argentine Wheat Cultivars. *Crop Sci.* 38:1203-1209.

Aguirrezábal L., y F. Andrade. 1998. Calidad de productos agrícolas. Bases ecofisiológicas, genéticas y de manejo agronómico. Unidad Integrada Balcarce INTA, FCA UNMP. 315pp.

Aguirrezábal L., P. Martre, G. P. Irujo, N. Izquierdo, and V. Allard. 2009. Management and breeding strategies for the improvement of grain and oil quality. Chapter 16 in V. Sadras and D. Calderini (Eds). *Crop Physiology. Applications for genetic Improvement and agronomy.* Academic Press. Elsevier. Amsterdam. 581pp.

Andrade F. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. *Bol. Tec.* 106. EEA INTA Balcarce. 16 pp.

Andrade F. 2011. La tecnología y la producción agrícola. El pasado y los actuales desafíos. Ediciones INTA. 60 pp.

Andrade F., and M.A. Ferreiro. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Res.* 48:155-165.

Andrade F., y V. Sadras. 2002. Bases para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja, INTA Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Buenos Aires, Argentina. 450 pp.

Andrade F., and P. Abbate. 2005. Response of maize and soybean to variability in stand uniformity. *Agron. J.* 97:1263-1269.

Andrade F., S.A. Uhart, and A.G. Cirilo. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Res.* 32:17-25.

Andrade F., A. Cirilo, S. Uhart, y M. Otegui. 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa, Dekalb Press. INTA, FCA UNMP. 292 pp.

Andrade F., C.R. Vega, S.A. Uhart, A.G. Cirilo, M. Cantarero, and O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39:453-459.

Andrade F., P. Calviño, A. Cirilo, and P. Barbieri. 2002a. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. *Agron. J.* 94:975-980.

Andrade F., L. Echarte, R. Rizzalli, A. Della Maggiora, and M. Casanovas. 2002b. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42:1173-1179.

Andrade F., V. Sadras, C. Vega, and L. Echarte. 2005. Physiological determinants of crop growth and yield in maize, sunflower and soybean. Applications to crop management, modeling and breeding. *J. Crop Improvement* 14:51-101.

Andrade F., R. Sala, A. Pontaroli, and A. León. 2009. Integration of biotechnology, plant breeding and crop physiology. Dealing with complex interactions from a physiological perspective. Chapter 11 in V. Sadras and D. Calderini (Eds). *Crop Physiology. Applications for genetic Improvement and agronomy.* Academic Press. Elsevier. Amsterdam. 581pp.

Andrade F., P.E. Abbate, M.E. Otegui, A.G. Cirilo and A. Cerrudo. 2010. Eco-physiological basis for crop management. *The Americas Journal of Plant Science & Biotechnology* 4:23-34. ISSN 1752-3877.

Andrade J.F., A. Cerrudo, R. Rizzalli, and J. Monzon. 2012. Sunflower–soybean intercrop productivity under different water conditions and sowing managements. *Agron. J.* 104:1049–1055.

Andriani J., F. Andrade, E. Suero, and J. Dardanelli. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. 1. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11: 737-746.

Ashraf M. 2010. Inducing drought tolerance in plants: recent advances. *Biotechnology advances* 28:169–183.

Barbieri P., H. Sainz Rozas, H. Echeverría, and F. Andrade. 2008. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100:1094-1100

Barbieri P., L. Echarte, A. Della Maggiora, V.O. Sadras, H. Echeverria, and F.H. Andrade. 2012. Maize yield, evapotranspiration and water-use efficiency in response to row spacing at different N supply and water regimes. *Agron. J.* 104:939-944.

Bedmar F., J. Eyherabide y E. Satorre. 2002. Bases para el manejo de malezas. Capítulo 10 en F. Andrade y V. Sadras (Eds). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja.* Unidad Integrada INTA Balcarce FCA UNMP. 450pp.

Bellis M. 2010. *The Agricultural Revolution.* Introduction to the Agricultural Revolution. About.com Guide.

Bolaños J., and G.O. Edmeades. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation utilization. *Field Crops Res.* 31:233-252.

Boote K., J. Jones, J. Mishoe, and R. Berger. 1983. Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions. *Phytopathology* 73:1581-1587.

Boote K., J. Jones, J. White, S. Asseng, and J. Lizaso. 2013. Putting mechanisms into crop production models. *Plant, Cell & Environment* 36:1658–1672.

Borlaug N. 2007. Sixty-two years of fighting hunger: personal recollections. *Euphytica* 157:287–297.

Borrás L., G.A. Slafer, and M.E. Otegui. 2004. Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative re-appraisal. *Field Crops Res.* 86:131-146.

Bourne J. 2009. El fin de la abundancia. *Nacional Geographic*. 439-459. ngenespanol.com/2009/.../el-fin-de-la-abundancia-la-crisis-alimentaria-mundial-articulos.

Boyer J. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiol.* 46:233-235.

Bringzu S., M. O'Brien, W. Pengue, M. Swilling, and L. Kauppi. 2010. Assessing global land use and soil management for sustainable resource policies. Scoping Paper. International Panel for Sustainable Resource Management. UNEP.

Bruinsma J. (2009). The Resource Outlook to 2050: By how much do land, water, and crop yields need to increase by 2050? Paper presented at the FAO Expert Meeting, 24-26 June 2009, Rome on "How to Feed the World in 2050".

Calviño P., V. Sadras and F. Andrade. 2002. Development, growth and yield of late-sown soybean in the southern Pampas. *Europ. J. Agronomy* 19:265-275.

Campos H., M. Cooper, J. Habben, G. Edmeades, and J. Schussler, 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Res.* 90:19-34.

Cantagallo J., C. Chimenti, and A. Hall. 1997. Number of seeds per unit area in sunflower correlates well with a photothermal quotient. *Crop Sci.* 37:1780-1786.

Capristo P., R. Rizzalli, and F. Andrade. 2007. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity. *Agron. J.* 99:1111-1118.

Cassman K., P. Grassini, and J. van Wart. 2010. Crop yield potential, yield trends, and global food security in a changing climate. Chapter 3 in D. Hillel

and C. Rosenzweig (Eds). Handbook of climate change and agroecosystems. Imperial College Press. London. 452pp.

Castro S. 2013. Estabilidad de rendimiento y mecanismos ecofisiológicos asociados con la fijación de granos en híbridos de maíz y en sus líneas parentales. Tesis de Magister Scientiae, UNMP.

Caviglia O., and F. Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science & Biotechnology* 3:1-8.

Caviglia O., V. Sadras, and F. Andrade. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Res.* 87:117–129.

Caviglia O., R. Rizzalli, N. Van Opstal, P. Barbieri, R. Melchiori, A. Cerrudo A., V. Gregorutti, J. Monzón, P. Barbagelata, J. Martinez, F. García, y F. Andrade. 2012. Productividad y eficiencia en el uso de agua y nitrógeno en sistemas intensificados. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 7:6-10.

Cerrudo A., J. Di Matteo, E. Fernandez, E., M. Robles, L. Olmedo Pico, and F. Andrade. 2013. Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop & Pasture Science* 64: in press.

Chapman S.C., G. Hammer, D. Podlich, and M. Cooper. 2002. Linking biophysical and genetic models to integrate physiology, molecular biology and plant breeding. In: M. Kang (Ed). *Quantitative genetics, genomics and plant breeding*. CAB International, pp. 167-187.

Cirilo A.G., and F.H. Andrade. 1994a. Sowing date and maize productivity. I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34:1039-1043.

Cirilo A.G., M. Actis, F.H. Andrade, and O.R. Valentinuz. 2011. Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crops Res.* 122:140-150.

Coll L., A. Cerrudo, R. Rizzalli, J. Monzon, and F. Andrade. 2012. Capture and use of water and radiation in summer intercrops in the south-east Pampas of Argentina. *Field Crops Res.* 134:105–113.

Creus, C., M. Bazzalo, M. Grondona, F. Andrade, and A. León. 2007. Disease expression and ecophysiological yield components in sunflower isohybrids with and without *Verticillium dahliae* resistance. *Crop Sci.* 47:703-710.

Della Maggiora A. J. Gardiol y A. Irigoyen, 2002. Requerimientos hídricos. Capítulo 6 en F. Andrade y V. Sadras (Eds). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Unidad Integrada INTA Balcarce FCA UNMP. 450pp.

De Santa Eduviges J.M. 2010. Potencial de rendimiento y tolerancia a sequía en híbridos de maíz. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP. 70 pp.

Dent D. 1995. Integrated pest management. Chapman and Hall. London. 356 pp.

Dosio G.A., L. Aguirrezábal, F. Andrade, and V. Pereyra. 2000. Solar radiation intercepted during seed filling and oil production in two sunflower hybrids. Crop Sci. 40:1637-1644.

Dubos R. 1985. Pasteur. Salvat Editores SA. Barcelona España. Carles Scribner's sons.

Echarte L., F. Andrade, V. Sadras, and P. Abbate. 2006. Kernel weight and its response to source manipulations during grain filling in Argentinean Maize Hybrids Released in different decades. Field Crops Res. 96:301-312.

Echarte L., L. Nagore, J. Di Matteo, M. Cambareri, M. Robles, and A. Della Maggiora. 2013. Grain Yield Determination and Resource Use Efficiency in Maize Hybrids Released in Different Decades. In: M. Stoytcheva (Ed.) "Agricultural Chemistry" <http://dx.doi.org/10.5772/5528>.

Edgerton M.D. 2009. Increasing crop productivity to meet global needs for feed, food and fuel. Plant Physiology 149:7-13.

Edmeades G., G. McMaster, J. White, and H. Campos. 2004. Genomics and the physiologists: bridging the gap between genes and crop response. Field Crop Res. 90:5-18.

Egli D. 1998. Seed biology and the yield of grain crops. CAB International. 178 pp.

Egli D., and W. Bruening. 2005. Shade and temporal distribution of pod production and pod set in soybean. Crop Sci. 45:1764-1769.

Evans L.T. 1997. Adapting and improving crops: the endless task. Phil Trans R. Soc. Lond. B. 354:901-906.

FAO 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. FAO Statistical Database. <<http://www.fao.org/>>.

Fiorani F., and U. Schurr. 2013. Future Scenarios for Plant Phenotyping. *Annual Review of Plant Biology* 64:267-291.

Fischer R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105:447-461.

Fischer R.A., and G. Edmeades. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50:585-598.

Fischer R.A., D. Byerlee, and G.O. Edmeades. 2009. Can technology deliver on the yield challenge to 2050? Paper prepared for expert meeting on "How to Feed the World in 2050." 24–26 June 2009. FAO, Rome.

Fonts, C., F. Andrade, M. Grondona, A. Hall, and A. León. 2008. Phenological characterization of near-isogenic sunflower families bearing two QTL for photo-periodic response. *Crop Sci.* 48:1579-1585.

Gardner F., R. Pearce, and R. Mitchel. 1985. *Physiology of crop plants*. Iowa State University Press. USA. 327 pp.

Godfray H.C., J. Beddington, I. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S. Thomas, and C. Toulmin. 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327:812-818.

Hall A. and V. Sadras. 2009. Whither crop physiology? Chapter 21 in V. Sadras and D. Calderini (Eds). *Crop Physiology. Applications for genetic Improvement and agronomy*. Academic Press. Elsevier. Amsterdam. 581pp.

Hallauer A.R., 2007. History, contribution, and future of quantitative genetics in plant breeding: Lessons from maize. *Crop Sci.* 47:S4-S19.

Hanks J., and J. Ritchie. 1991. *Modelling plant and soil systems*. ASA, CSSA, SSSA. Wisconsin.

Holland J.B., 2007. Genetic architecture of complex traits in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 10:156-161.

Huang J., C. Pray, and S. Rozelle. 2002. Enhancing the crops to feed the poor. *Nature* 418:678-684.

Ikerd J. 1990. Agriculture's search for sustainability and profitability. *J. Soil Water Cons.* 45:18-23.

INTA. 2013. *Criterios para la gestión de uso de los agroquímicos con un marco de ordenamiento territorial*. Cerbas, Balcarce. 50 pp.

IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate change 2007: the physical science basis (summary for policy makers), <http://www.Ipcc.ch>

Ishitani M., I. Rao, P. Wenzl, S. Beebe, and J. Tohme. 2004. Integration of genomics approach with traditional breeding towards improving abiotic stress adaptation: drought and aluminium toxicity as case studies. *Field Crops Res.* 90:35-45.

Izquierdo N., L. Aguirrezábal, F. Andrade and V. Pereyra. 2002. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Res.* 77:115-126.

Izquierdo N. L. Aguirrezábal, F. Andrade, C Geroudet, M. Pereyra Iraola, and O. Valentinuz. 2009. Intercepted solar radiation affects oil fatty acid composition in crop species. *Field Crops Res.* 114:66-74.

Jayasundara S., C. Wagner-Riddle, G. Parkin, P. von Bertoldi, J. Warland, B. Kay, and P. Voroney. 2007. Minimizing nitrogen losses from a corn–soybean–winter wheat rotation with best management practices. *Nutr Cycl Agroecosyst* 79:141–159.

JICA-INTA. 2004. Seminario: Sustentabilidad de la producción agrícola. 29 y 30 de Marzo de 2004. Buenos Aires, Argentina.

Johnson K.B. 1987. Defoliation, disease and growth: a reply. *Phytopathology* 77:1495-1497.

Jones N., H. Ougham, and H. Thomas. 1997. Markers and mapping: we are all geneticists now. *New Phytol.* 137:165-177.

Kantolic A., and G. Slafer. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Res.* 72:109-118.

León, A., M. Lee, and F. Andrade. 2001. Quantitative trait loci for growing degree days to flowering and photoperiod response in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Theor. Appl. Genet.* 102:497-503.

Maccaferri M., M. Sanguineti, A. Demontis, A. El-Ahmed, L. Garcia del Moral, F. Maalouf, M. Nachit, N. Nserallah, H. Ouabbou, S. Rhouma, C. Royo, D. Villegas, and R. Tuberosa. 2011. Association mapping in durum wheat grown across a broad range of water regimes. *J. Exp. Botany* 62:409-438.

Mackay T. 2001. The genetic architecture of quantitative traits. *Annu. Rev. Genet.* 35:303-339.

Malthus T. 1798. *An Essay on the Principle of Population*. Johnson, London. 1st edition.

Martre P., N. Bertin, C. Salon, and M. Génard. 2011. Modelling the size and composition of fruit, grain and seed by process-based simulation models. *New Phytologist* 191:601-618.

Mc Donald G. and G. Gill. 2009. Improving crop competitiveness with weeds : adaptations and trade offs. Chapter 18 in V. Sadras and D. Calderini (Eds). *Crop Physiology. Applications for genetic Improvement and agronomy*. Academic Press. Elsevier. Amsterdam. 581pp.

Meadows D., J. Randers J., y D. Meadows. 2012. *Los límites del crecimiento*. Tauros. Buenos Aires. 424 pp.

Monzón P., V. Sadras, and F. Andrade. 2012. Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *Field Crops Res.* 130: 8-18.

Nagore M.L., L. Echarte, A. Della Maggiora, y F. Andrade. 2010. Rendimiento, consumo y eficiencia de uso del agua del cultivo de maíz bajo estrés hídrico. IX Congreso Nacional de Maíz, Simposio Nacional de Sorgo. 17 al 19 de Noviembre de 2010, Rosario, Buenos Aires, Argentina.

Nature 2010. How to feed a hungry World. *Nature Editorials* 466:531-532.

Otegui M. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: II. Plant population effects. *Crop Sci.* 37:448-455.

Otegui M., M. Nicolini, R. Ruiz, and P. Dodds. 1995a. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87:29-33

Otegui M., F. Andrade, and E. Suero. 1995b. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res.* 40:87-94.

Passioura J.B., 2007. The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. *J. Exp. Bot.* 58:113-117.

Pereyra-Irujo G., E. Gasco, L. Peirone, and L. Aguirrezábal. 2012. Glyph: a low-cost platform for phenotyping plant growth and water use. *Functional Plant Biology* 39:905-913.

Pietrobon, M. 2012. Densidad de plantas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) y su efecto sobre la eficiencia de uso de nitrógeno. Tesis. MSc UNdMP. 92 pp.

Raskin P., T. Banuri, G. Gallopin, P. Gutman, A. Hammond, R. Kates, and R. Swart. 2002. Great Transition. The Promise and Lure of the Times Ahead. A report of the Global Scenario Group. Stockholm Environment Institute – Boston.

Rebetzke G.J., A. Condon, R. Richards, and G. Farquhar. 2002. Selection for reduced carbon isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. *Crop Sci.* 42:39-745.

Robles M., A. Cerrudo, J. Di Matteo, P. Barbieri, R. Rizzalli, y F. Andrade. 2011. Nitrogen use efficiency of maize hybrids released in different decades. ASA Congress. USA. 2011.

Russell WA. 1984. Agronomic performance of maize cultivars representing different eras of maize breeding. *Maydica* 29:375-390.

Sadras V. 2002. Plagas y cultivos. Una perspectiva fitocéntrica. Capítulo 12 en F. Andrade y V. Sadras (Eds). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Unidad Integrada INTA Balcarce FCA UNMP. 450pp.

Sadras V., and D. Calderini. 2009. Crop Physiology. Applications for genetic Improvement and agronomy. Academic Press. Elsevier. Amsterdam. 581pp.

Sala R. y F. Andrade. 2010. Perspectivas de interacción entre mejoradores y ecofisiólogos a la luz de las nuevas biotecnologías. En D. Miralles, L. Aguirrezábal, M. Otegui, B. Kruk, y N. Izquierdo (Eds). Avances en ecofisiología de cultivos de granos. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 1ra ed. 306 pp.

Sarlangue T., F. Andrade, P. Calviño, and L. Purcell. 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agron. J.* 99:984-991.

Satorre E. 2004. Marco conceptual de la sostenibilidad. Seminario: Sustentabilidad de la producción agrícola. Bs As. JICA-INTA.

Satorre E. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura actual. *Ciencia Hoy* 15:24–31.

Satorre E.H., R. Benech Arnold, G. Slafer, E. de La Fuente, D. Miralles, M. Otegui, y R. Savin. 2008. Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo. (3ra edición) Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina. 783 pp.

Shibles R.M., and C.R. Weber. 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Sci.* 6:55-59.

Sinclair T.R., and L. Purcell. 2005. Is a physiological perspective relevant in a 'genocentric' age? *J. Exp. Bot.* 56:2777-2782.

Slafer G., F. Andrade, and E. Satorre. 1990. Genetic-improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Res.* 23:255-263.

Stafford J. 2005. Precision agriculture. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. 1005 pp.

Summerfield R., R. Lawn, A. Qi, R. Ellis, E. Roberts, P. Chay, J. Brower, J. Rose, S. Shanmugasundram, S. Yeates, and S. Sandover. 1993. Towards a reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. *Expl. Agric.* 27:11-31.

Tester M., and P. Langridge. 2010. Breeding Technologies to increase crop production in a changing World. *Science* 327:818-822.

Tilman D., K. Cassman, P. Mayson, R. Naylor and, S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671-677.

Tollenaar M, and E. Lee. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research* 75:161-169.

Tollenaar M., and E. Lee. 2010. Strategies for enhancing grain yield in maize. *Plant Breeding Reviews* 30:37-82.

Tuberosa R., and S. Salvi. 2009. QTL for agronomic traits in maize production. *Handbook of maize: its biology.* In J. Bennetzen and S. Hake (Eds). Springer. London. Pp. 501-541.

Tuberosa R., S. Salvi, S. Giuliani, M. Sanguineti, E. Frascaroli, S. Conti, and P. Landi. 2011. Pp. 179-204 in *Root Genomics.* A. Costa de Oliveira and R. Varshney (Eds). Springer. London.

UN, 2008. United Nations Population division. World population prospects. The 2008 revision. <http://www.un.org/esa/population/>.

Uhart S., and F. Andrade. 1991. Source-sink relationship in maize grown in a cool temperate area. *Agronomie* 11:863-875.

Uhart S., and F. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci.* 35:1376-1383.

Vega C., y F. Andrade. 2002. Densidad de plantas. Capítulo 4 en F. Andrade y V. Sadras (Eds). Bases para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja, INTA Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Buenos Aires, Argentina.

Vega V., F. Andrade, and V. Sadras. 2001. Reproductive plasticity and seed set efficiency in sunflower, soybean and maize. *Field Crops Res.* 72:163-175.

Viglizzo E., F. Frank, L. Carreño, E. Jobbagy, H. Pereyra, J. Clatt, D. Pince, and M. Ricard. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17:959-973.

Wackernagel M., and W. Rees. 1996. "Our ecological footprint . Reducing human impact on the Earth. *Environment and Urbanization* 8:216–216.

Wollenweber B., J. Porter, and T. Lubberstedt. 2005. Need for multidisciplinary research towards a second green revolution. *Current Opinion in Plant Biology* 8:337-341.